



導波路構造GaP結晶によるテラヘルツ電磁波の高効率発生

| | |
|--------|---|
| 著者 | 齊藤 恭介 |
| 号 | 53 |
| 学位授与番号 | 4150 |
| URL | http://hdl.handle.net/10097/42564 |

氏 名 さいとう きょうすけ 齊藤 恭介
授与学位 博士(工学)
学位授与年月日 平成21年3月25日
学位授与の根拠法規 学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称 東北大学大学院工学研究科(博士課程) 知能デバイス材料学専攻
学位論文題目 導波路構造 GaP 結晶によるテラヘルツ電磁波の高効率発生
指導教員 東北大学教授 小山 裕
論文審査委員 主査 東北大学教授 小山 裕 東北大学教授 谷内 哲夫
東北大学教授 佐藤 俊一

論文内容要旨

第1章 序論 本研究の意義

非線形光学効果の一種である差周波混合により THz (テラヘルツ) 波の発生がなされている。非線形光学結晶として近赤外および THz 領域において透明性を有し、波長変換効率の大きい GaP 結晶に注目している。これまでバルク GaP 結晶を用いたノンコリニア位相整合による THz 波の発生がなされ、THz 分光測定やイメージングに応用している。ここで、新たな THz デバイスとして、導波路効果を用いた THz 光源を提案する。導波路サイズが THz 波波長と同程度になると導波路効果により屈折率分散が変化し、コリニア位相整合による THz 波の発生が期待される。本手法の実現により、THz 光源の高効率化、小型化そして光通信技術との融合により THz 光源の可能性が拡大する。本論文では、THz 波の閉じ込めが可能な導波路構造における非線形光学効果に基づく THz 波発生機構を明らかにし、THz 波光源の高機能化・高効率化を目的として研究を行った。

第2章 差周波混合に基づくテラヘルツ波の発生原理

差周波混合過程に基づく THz 波発生原理について述べた。差周波混合における位相整合条件に関して、THz 波波長程度の断面サイズを有する GaP 結晶導波路では THz 領域に導波路分散関係が生じる。導波路分散を利用することにより、励起光である近赤外光および THz 波の屈折率差を減少し、差周波混合におけるコリニア位相整合条件が成立することを示した。差周波混合により発生する THz 波出力特性を理解するため、非線形媒質における波動方程式を出発点として2つの近赤外光および THz 波の3波に対する結合方程式を導出した。GaP 導波路の吸収係数、近赤外光および THz 波に対するビーム強度分布およびビームの重なり因子を考慮して結合方程式を解くことにより THz 波発生出力を表す理論式を得た。

第3章 GaP スラブ型導波路からのコリニア位相整合差周波混合による THz 波発生

1次元方向から THz 波を閉じ込める導波路構造であるスラブ型導波路構造を用いた導波路分散に基づくコリニア位相整合 THz 波の発生に関する研究結果について述べた。励起光として Nd:YAG レーザ及び光パラメトリッ

ク発振器(OPO)をベースとした $1\mu\text{m}$ 帯の近赤外光を用いた。GaP スラブ型導波路から発生する TE モード THz 波出力特性についてスラブ厚さ、導波路長さおよび偏光依存性について調査した。スラブ厚さの減少に伴い発生周波数位置が高周波数側にシフトする傾向を得た。これはスラブ型導波路における THz 波に対する分散関係の変化に伴い位相整合条件が成立する周波数位置が高周波数側へシフトためであると説明できる。THz 波出力特性の導波路長依存性に関して、導波路長さの増加により THz 波出力は増加するが導波路長さ 10mm 程度から THz 波出力の飽和傾向がみられた。これは、GaP 導波路中の THz 波に対する吸収係数が存在するためである。吸収係数を見積るとおよそ 2cm^{-1} の値が得られ、バルク GaP 結晶に対する THz 波透過測定から得られた値(1.8cm^{-1})と同程度であることを確認した。

スラブ型導波路における伝播モードとして TE モードの他に TM モードが存在する。励起光の偏光方向を調整することにより、選択的に TE および TM モード THz 波を発生することができる。厚さ $290\mu\text{m}$ のスラブ導波路における、各モードに対する THz 波発生を行ったところ、TE および TM モード THz 波の発生周波数位置はそれぞれ 0.8 および 0.95THz であり、発生出力は同程度であった。また、位相不整合による発生周波数帯域の広がりにより、各モード間の帯域に重なりがみられた。発生周波数位置の差は TE および TM モード分散の違いに基づく実効屈折率差を反映している。TE、TM モード間に実効屈折率差が存在すること、各モードから発生した THz 波の発生周波数帯域に重なりが確認できたことを踏まえ、TE および TM モード間の位相差を利用した THz 波偏光状態の楕円偏光化を行った。励起光偏光を制御することにより TE および TM 両成分をもつ THz 波の発生を確認した。各モード間に導波路長さに応じた位相差が生じ THz 波の楕円率が増加した。さらに、右回りおよび左回りの楕円偏光の切り替えが励起光偏光方向を切り替えることで容易に行えることを見出した。

第4章 GaP リブ型導波路からの高効率 THz 波発生

第3章では THz 波に対する1次元方向閉じ込め構造であるスラブ型導波路における導波路分散を利用したコリニア位相整合 THz 波発生について述べた。本章では、2次元方向から THz 波の閉じ込めが可能な導波路構造であるリブ型導波路の作製および THz 波発生効率の高効率化を検討した。GaP リブ型導波路は、Ar、Cl₂ 混合ガスを用いた誘導結合プラズマ反応性イオンエッチング(ICP-RIE)により作製された。コイルおよび引き出し電極を独立して制御できるため、高プラズマ密度かつ低イオンエネルギーによるエッチングが実現できる。これによりリブ高さ $200\mu\text{m}$ の垂直側壁をもつリブ導波路構造を形成することが可能となった。

作製した GaP リブ型導波路を用いて THz 波発生を行った。リブ幅を変化させた場合、コア断面積減少により実効屈折率が変化し発生周波数位置が高周波数側へシフトした。リブ幅とリブ厚さが同程度のサイズになると偏光無依存導波路の傾向を示した。続いて、励起光ビーム断面積を減少することにより THz 波出力の向上を試みた。バルク GaP 結晶やスラブ型導波路に対して THz 波出力の励起光ビーム径依存性を調べたところ、およそ $200\mu\text{m}$ 以下のビーム径において THz 波出力が飽和傾向を示した。それに対して、リブ型導波路では $200\mu\text{m}$ 以下のビーム径に対しても THz 波出力の増加傾向を確認した。THz 波出力が飽和傾向を示す理由として、THz 波の回

折現象による広がりと考えられる。バルクおよびスラブ型導波路ではTHz波の閉じ込めが不十分であるため、THz波広がりによる近赤外光とTHz波強度分布の重なりが減少する。これにより導波路内部でのTHz波に対するコヒーレント加算が十分になされずTHz波出力が向上しないと考えられる。リブ型導波路構造では2次元方向からTHz波が閉じ込められるため、近赤外光とTHz波とのビームの重なりを維持することができTHz波出力が向上したと考えられる。

リブ型導波路におけるTHz波変換効率を算出し、バルクGaP結晶およびスラブ型導波路の値と比較した。リブ幅300 μm および200 μm の導波路におけるTHz波の発生効率は、バルクGaP結晶と比較して、それぞれおよそ7倍および9倍程度向上した(図1)。以上の結果より、THz波に対する2次元閉じ込め構造であるGaPリブ型導波路構造がTHz波の高効率化に有効であることを示した。

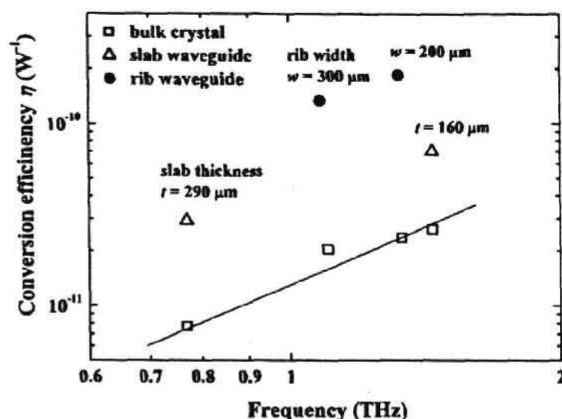


図1 GaPバルク結晶、スラブ型およびリブ型導波路から得られたTHz波の変換効率

第5章 GaP フォトニック結晶導波路を用いたTHz波発生

第4章では、THz波を2次元方向から閉じ込めが可能な構造の一つであるリブ型導波路構造におけるTHz波発生出力の高効率化について検討した。本章では、もう一つのTHz波に対する2次元方向閉じ込め構造として、THz領域において機能する2次元三角格子配列フォトニック結晶導波路に着目し、ICP-RIEによるフォトニック結晶導波路構造作製、THz波透過特性評価、ならびにTHz波出力特性評価を行い、THz波発生素子としてのフォトニック結晶導波路の可能性を検討した。ICP-RIEによりGaP基板(厚さ300 μm)に対して空気円柱(半径80 μm)を三角格子状(格子定数200 μm)に配置したフォトニック結晶構造を作製した。作製したフォトニック結晶に対してTHz波透過測定を行い、線欠陥が無いフォトニック結晶について0.52 THzに高周波数側のフォトニックバンド端を確認した。一方、線欠陥を導入したフォトニック結晶導波路では、フォトニックバンドギャップの内部に位置する0.5 THzにおいてTHz波透過を確認した。これは、線欠陥に起因する導波路モードがバンドギャップ内に生じていると考えられる。

フォトニック結晶線欠陥導波路を用いてTHz波の発生を試みた。0.7 THz付近に出力ピークをもつTHz波発生がみられたことから、線欠陥構造を導入することでTHz波導波路構造として機能することを確認した。さらに、位相不整合領域に位置する0.5 THzにおいて2つの急峻な出力ピークがみられた。線欠陥フォトニック結晶導波路に対するTHz波透過測定結果から、この周波数位置におけるTHz波出力ピークは、フォトニックバンドギャップ内に形成された欠陥準位に基づく導波路モードに起因して発生したためであると考えられる。このようにフォトニック結晶線欠陥構造がもつTHz波導波路効果のみならず、周期的屈折

率変調効果に基づくフォトニック結晶特有の THz 波物性を利用した高機能 THz 波光源開発の可能性を示した。

第6章 総括

本論文では、THz 波の閉じ込めが可能な導波路構造を用いてコリニア位相整合差周波混合に基づく THz 波発生を実現した。そして、2 次元方向に THz 波の閉じ込めが可能な構造である GaP リブ型導波路構造を ICPRIE により作製し THz 波発生効率の高効率化を達成した。さらに、THz 周波数領域で機能するフォトニック結晶を THz 波発生に応用することにより、フォトニック結晶固有の光物性を利用した機能性 THz 波光源の可能性を示した。今後、本論文で得られた成果が THz 波計測システムの小型化・高精度化への足がかりになると期待している。

論文審査結果の要旨

電波と光の中間周波数帯に位置するテラヘルツ(THz, Terahertz, $1\text{ THz}=10^{12}\text{ Hz}$)波は、永年、未開拓な周波数帯域であったが、ようやくその基礎科学・応用分野の重要性が認識されはじめた。THz 帯域には固体物質中のフォノン、生体分子の固有振動、分子間相互作用に関連したエネルギー準位が数多く存在すると考えられており、新規医薬品開発やガン検出・治療、医療イメージングなど、広範な応用が期待されている。そのため、近年、種々のテラヘルツ光源が開発されているが、その中でも高品質 GaP 半導体結晶の非線形光学現象を用いた差周波混合による発生技術は、発生周波数帯域の広さや発生出力そして高い周波数純度の点で優れている。しかし、バルク状 GaP 結晶を用いた差周波混合によるテラヘルツ波発生は、その高い透明性と安定性そして非線形光学定数の点では優位であるが、等方性結晶であるため近赤外線の差周波混合によるテラヘルツ波発生のためには運動量保存則を満足するための角度位相整合を満たす必要があるため、発生効率の点で大いに改善すべき課題があった。

本論文は、GaP 結晶による差周波混合を用いたテラヘルツ電磁波発生の高効率化を目指し、低次元導波路構造によるテラヘルツ電磁波の閉じ込め効果によって、発生効率の大幅な向上を達成した成果をまとめたものであり、全6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、差周波混合に基づくテラヘルツ電磁波の発生原理を述べており、エネルギーと運動量保存則に基づく発生原理と、低次元化した導波路構造の場合の屈折率の分散関係から変換効率の高効率化が達成される原理について述べている。

第3章では、一次元導波路構造であるスラブ型導波路を作成し、差周波混合によるテラヘルツ電磁波の発生効率向上を達成した成果を示すと同時に、伝搬モード間の位相差を利用した円偏光あるいは楕円偏光テラヘルツ電磁波発生を示している。

第4章では、更に高い閉じ込め効果が期待できる二次元リブ型導波路構造について述べており、導波路構造作成のための、100ミクロン以上に達するディーププラズマエッチングプロセスの確立と、その手法を適用した種々のリブ型導波路のテラヘルツ波発生特性についての成果を示している。

第5章では、GaP 等の物質固有の特性に制限されない、更に高効率な発生を目指すテラヘルツ帯域の二次元フォトニック結晶導波路構造について述べており、その構造作成のための ICP-RIE エッチング技術の確立と導波路としての特性把握を行った結果について述べている。

第6章は本論文の総括である。

以上要するに、高純度 GaP 結晶を用いて一次元及び二次元のテラヘルツ帯導波路構造を実現し、それを差周波混合によるテラヘルツ電磁波発生に適用して発生効率の大幅な向上を達成したものであり、材料物理学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。